第46卷 第8期
2023年8月

干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

Vol. 46 No. 8
Aug. 2023

1956—2021年疏勒河上游山区洪水变化特征研究

王学良[1,2,3]， 陈仁升[1]， 刘俊峰[1]， 曹珊珊[4]

（1. 中国科学院西北生态环境资源研究院黑河上游生态-水文试验研究站，甘肃 兰州 730000；2. 中国科学院大学，北京 100049；3. 甘肃省平凉水文站，甘肃 平凉 744000；4. 甘肃省水文站，甘肃 兰州 730000）

摘 要：基于1956—2021年疏勒河上游昌马河出山口昌马堡水文站的实测洪水数据及流域内或周边鱼儿红雨量站和托勒气象站的气温和降水数据，采用Sen's slope估计法、Mann-Kendall检验法，抽样分析了年最大洪水（Annual maximum peak discharge，AMPD）系列、超定量阈值洪水（Peaks-over-threshold，POT3M）系列和基于广义极值（Generalized extreme value，GEV）分布不同级别洪水系列的变化特征。结果表明：（1）1956—2021年疏勒河上游昌马河昌马堡水文站洪水幅度和频次都为显著性增加的趋势，其中AMPD和POT3M系列的幅度变化趋势通过了显著性水平为0.01的检验，POT3M系列的频次变化趋势通过了显著性水平为0.05的检验，基于GEV分布不同级别洪水以小洪水为主，且总洪水频次通过了显著性水平为0.01的检验。（2）1987年以后气温和降水呈现波动性增加趋势，强降雨和升温引起的冰川、高山积雪及冻土融水增加等原因是3种抽样洪水系列幅度和频次显著性增加的主要原因。

关 键 词：疏勒河；昌马堡水文站；洪水；变化特征

文章编号：1000－6060(2023)08－1260－09(1260～1268)

河流洪水是人们最关心的自然灾害问题之一。根据联合国有关部门的统计数据，1995—2015年洪水是全世界所有记录自然灾害中最频繁的事件，占所有灾害的43%，全球每年平均损失估计为1040×10^8 USD[1]。洪水产生的影响和不同区域内洪水的变化特征已经引起了广泛的关注，并成为世界范围水文学领域许多研究的焦点[2-4]。如洪水的幅度和频次的增加或减少与区域范围内的温度上升、强降水和水文循环加速等水文要素有关[5-7]。

从已有研究来看，与气候变化有关的洪水变化特征已经成为许多研究的热点问题，主要涵盖洪水事件的量级、频次和时间变化的影响[5-10]。最近的研究表明，欧洲范围的气候变化不仅改变了洪水的发生时间，而且由于秋季和冬季增加的降水导致了西北欧地区洪水的增加，相反由于降水减少、温度升高和蒸发量增加导致东南部洪水的减少[5-6]。已有学者在中国西北的干旱和半干旱地区也开展了一些研究，如Zhang等[11]发现20世纪90年代后塔里木河流域的洪水规模呈现增加的趋势，特别是位于高纬度的河流。蒋军新等[12]和毛炜峄等[13]发现天山山脉的典型流域，如阿克苏河、托什干河、库玛拉克河、玛纳斯河和乌鲁木齐河，在过去50 a，随着气候变化的影响，洪水量级明显增加。Wang等[14]也发现1970—2019年发源于祁连山的12条河流洪水以夏季小洪水为主，洪水频次呈上升趋势，东部和西部地区存在差异，东部地区在减少，西部地区在增加。疏勒河正好位于祁连山和河西走廊的西部，研究表明上游出山口昌马堡水文站多年平均径流量约10.3×10^8 m^3[15]，上游的来水量对极度缺水的中下游干旱地区经济社会发展至关重要。疏勒河流域主要受高原季风和西风带的交汇影响[16-17]，上游山区高大山系分布较多，冰川和积雪发育，径流主要

收稿日期：2022-10-23； **修订日期：**2023-02-03

基金项目：国家重点研发计划课题(2019YFC1510500)；国家自然科学基金项目(42171145)；甘肃省自然科学基金项目(21JR7RA043)资助

作者简介：王学良(1982-)，男，博士研究生，高级工程师，主要从事寒旱区水文与水资源研究. E-mail: wangxueliang@nieer.ac.cn

通讯作者：陈仁升(1974-)，男，博士，研究员，主要从事寒区水文观测与模拟研究. E-mail: crs2008@lzb.ac.cn

由降水和冰雪融水形成[18]。因此，在气候变化背景下，分析和探究疏勒河历史时期的洪水变化规律，对中下游人民财产安全和经济社会发展具有重要意义。

研究基于过去60多年疏勒河上游昌马河出山口昌马堡水文站的长序列实测洪水数据，采用年最大洪水(Annual maximum peak discharge，AMPD)系列、超定量阈值洪水(Peaks-over-threshold，POT3M)系列和基于广义极值(Generalized extreme value，GEV)分布不同级别洪水系列，分析了1956—2021年昌马堡水文站洪水系列的幅度和频次变化趋势，并试图探究洪水的变化特征与气候变化的归因关系。以期为当地防汛抢险、水利工程建设及调度管理、水资源管理等提供决策依据。

1 研究区概况

研究区概况如图1所示。疏勒河发源于祁连山脉的岗格尔肖合力岭，河源高程4737 m，干流全长583 km，集水面积4.13×10⁴ km²，地理位置介于92°54′~99°14′E，38°36′~41°34′N之间。从河源到昌马峡出山口(昌马堡水文站)为疏勒河上游，称之为昌马河，河流长347 km，集水面积约为1.10×10⁴ km²，地理位置介于96°42′~99°00′E，38°18′~39°54′N之间。干流从河源区开始由东南向西北穿行于托来南山与疏勒南山之间，两山分水岭高程一般在4000 m以上，其中疏勒南山的最高峰是宰吾吉勒峰，高程为5808 m，是祁连山脉的最高峰。上游海拔高程介于2080~5808 m，平均海拔3944 m，地形上主要由大雪山、疏勒南山、托来南山和疏勒河谷地组成，两侧山区地势高峻、地形陡峭，谷地地形相对平缓[19]。疏勒河上游由于海拔高，气候寒冷，成为现代山岳冰川和冻土发育区。冰川主要分布于疏勒河谷两侧的大雪山、疏勒南山和托来南山海拔4248 m以上的区域，覆盖面积达469.5 km²，约占流域面积的4.3%[14,18]。研究区总体呈现高原山地气候特征。

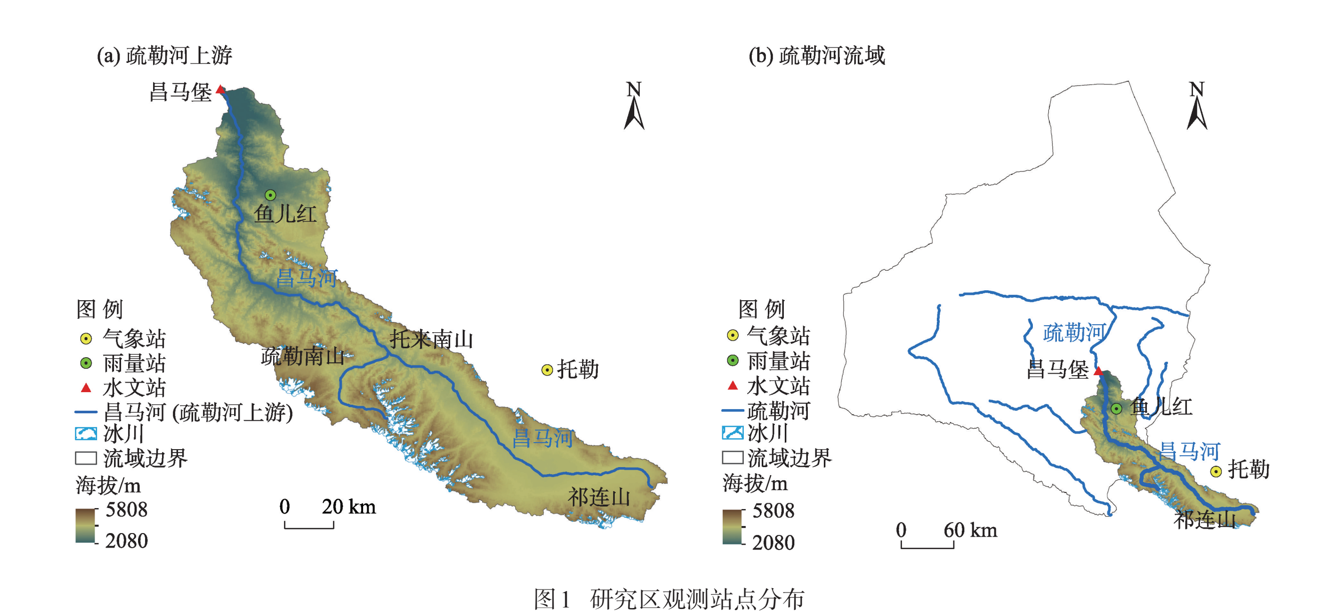


图1 研究区观测站点分布

Fig. 1 Distribution of observation stations in the study area

2 数据与方法

2.1 数据来源

选取疏勒河上游昌马河出山口昌马堡水文站为洪水观测站点，流域内鱼儿红雨量站和周边托勒气象站为气象观测站点。鱼儿红雨量站位于上游区间有连续降水观测资料，本文参考河源区周边托勒气象站的数据对比分析洪水变化特征对降水和气温变化的响应。水文站和气象站信息如图1和表1所示。洪水数据采用昌马堡水文站1956—2021年洪水观测值。昌马堡水文站和鱼儿红雨量站的数据来源于《中华人民共和国水文年鉴》，托勒气象站的数据来源于中国气象局信息中心(http://data.cma.cn)。

表1 研究区观测站点基本信息

Tab. 1 Basic information of observation stations in the study area

河流	观测站点	观测项目	流域面积/10^4 km^2	海拔/m	经度	纬度	数据系列
疏勒河	昌马堡水文站	流量	1.0961	2080	96°51′	39°49′	1956—2021年
	鱼儿红雨量站	降水	–	3030	97°06′	39°26′	1956—2021年
	托勒气象站	气温、降水	–	3367	98°25′	38°48′	1956—2021年

2.2 研究方法

2.2.1 Sen's slope估计 采用Sen's slope估计[20]分析疏勒河昌马堡水文站AMPD洪水系列、POT3M洪水系列和基于GEV分布不同级别洪水系列的幅度和频次变化趋势，以及鱼儿红雨量站和托勒气象站的气温和降水变化趋势。

$$\beta = \mathrm{median}\left(\frac{x_j - x_k}{j-k}\right),\quad j>k \tag{1}$$

式中：β为正值或负值表示上升或下降趋势，其值的大小表示趋势的斜率倾斜程度；x_j和x_k为时间序列数据，且x_j和x_k代表时间j和k的数据值。

2.2.2 Mann-Kendall检验法 采用Mann-Kendall检验法（M-K检验）对疏勒河昌马堡水文站AMPD洪水系列、POT3M洪水系列和基于GEV分布不同级别洪水系列的幅度和频次变化趋势，以及鱼儿红雨量站和托勒气象站的气温和降水变化趋势进行分析。

M-K检验法是一种广泛应用于水文和气象要素时间序列趋势分析的非参数检验方法。M-K检验法所选的样本不必先假设服从正态分布，也不受个别奇异特征数值的影响，其详细表达式见参考文献[21-22]。

2.2.3 POT3M洪水系列抽样方法 POT3M洪水系列中，洪水阈值的选择目前还尚无公认的客观方法[23]。部分学者通过试算确定平均每年发生洪水次数介于2.4~3.0之间对应的洪水流量为阈值，本研究最终通过试算确定洪水发生的频次为2.7场·a^{-1}。为了使抽样洪水洪峰的独立性假设可以成立，采用了Lang等[24]提出的洪水独立性判别方法，同时考虑了在中国西北干旱和半干旱地区应用的POT抽样方法[11-12]。在本研究中，所有抽样的洪水洪峰在持续时间（D）和中间最小流量（Q_{min}）方面都符合以下2个条件：

$$\begin{cases} D > 5 + \log(A) \\ Q_{min} < \dfrac{3}{4}\min(Q_1, Q_2) \end{cases} \tag{2}$$

式中：D为两场连续洪水洪峰流量之间的洪水持续时间（d）；A为集水面积（km^2）；Q_{min}为两场连续洪水洪峰流量Q_1和Q_2之间的最小流量（m^3·s^{-1}）。

2.2.4 基于GEV分布不同级别洪水系列抽样方法 基于GEV分布拟合AMPD洪水系列频率分布曲线，采用K-S检验法和PPCC检验法进行拟合优度检验和相似程度评价[25]。检验通过后计算洪水理论重现期并确定其相应的洪水流量阈值，根据不同重现期的洪水流量阈值将洪水等级分类为小洪水、中洪水和大洪水。对于干旱和半干旱地区的疏勒河来说，每年的洪水数量较少，参考《水文情报预报规范（GB/T 22482-2008）》中对洪水等级的划分，确定相应洪水等级分为：小洪水（重现期<5 a）；中洪水（5 a<重现期<20 a）；大洪水（重现期>20 a）。

GEV分布函数为：

$$G(x,\xi,\sigma,\mu) = \exp\left\{-\left[1+\xi\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)\right]^{-\frac{1}{\xi}}\right\},\ 1+\xi\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)>0 \tag{3}$$

式中：x为洪水序列数据；ξ为形状参数；σ为尺度参数；μ为位置参数。当ξ<0时，服从Weibull分布；当ξ=0时，服从Gumbel分布；当ξ>0时，服从Frechet分布。本研究采用极大似然估计法对GEV分布进行参数估计，其似然函数为：

$$L(\xi,\sigma,\mu) = -n\ln\sigma - \sum_{i=1}^{n}\left[1+\xi\left(\frac{x_i-\mu}{\sigma}\right)\right]^{-\frac{1}{\xi}} - \left(1+\frac{1}{\xi}\right)\times \sum_{i=1}^{n}\ln\left[1+\xi\left(\frac{x_i-\mu}{\sigma}\right)\right] \tag{4}$$

式中：n为时间序列长度；x_i为时间i的洪水序列数据。

3 结果与分析

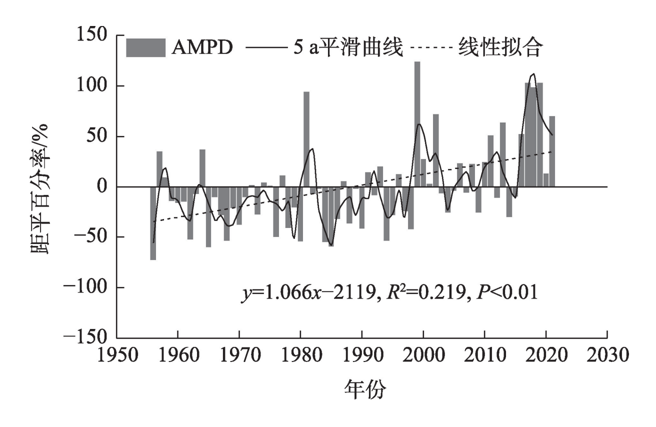
3.1 AMPD洪水系列变化特征

1956—2021年疏勒河昌马堡水文站AMPD洪水系列变化特征如图2和表2所示。年最大洪峰流量变异系数值为0.43，极值比为8.05，年际变化幅度极大，最大洪峰流量出现在1999年，为718 m^3·s^{-1}，而最小洪峰流量出现在1956年，为89.2 m^3·s^{-1}。从线性变化趋

表2 1956—2021年疏勒河昌马堡水文站AMPD洪水系列变化特征

Tab. 2 Characteristics of AMPD flood series at Changmabao hydrological station in the Shule River from 1956 to 2021

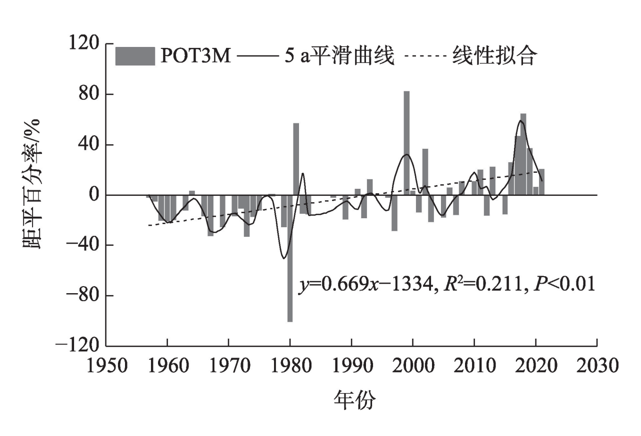
河流	水文站	平均洪峰		最大洪峰			最小洪峰			极值比
		流量/m³·s⁻¹	变异系数	流量/m³·s⁻¹	出现年份	与多年均值比	流量/m³·s⁻¹	出现年份	与多年均值比	
疏勒河	昌马堡	322	0.43	718	1999	2.23	89.2	1956	0.28	8.05



注：AMPD为年最大值抽样方法的洪水系列。

图2 1956—2021年疏勒河昌马堡水文站AMPD洪水系列幅度变化趋势

Fig. 2 Trend in the magnitude of AMPD flood series at Changmabao hydrological station in the Shule River from 1956 to 2021



注：POT3M为超定量阈值抽样方法的洪水系列。下同。

图3 1956—2021年疏勒河昌马堡水文站POT3M洪水系列幅度变化趋势

Fig. 3 Trend in the magnitude of POT3M flood series at Changmabao hydrological station in the Shule River from 1956 to 2021

势和5 a平滑曲线来看，AMPD洪水系列为增加趋势，线性倾向率为1.066，1956—1987年为保持平稳期，且大多数年份AMPD值小于距平值，1988—2021年为增加趋势，且1999年以后大多数年份AMPD值明显大于距平值。M-K检验中AMPD洪水系列通过了显著性水平0.01的检验，为显著性增加趋势。

3.2 POT3M洪水系列变化特征

3.2.1 POT3M洪水系列幅度变化 POT3M洪水系列幅度变化趋势如图3所示。从线性变化趋势和5 a平滑曲线来看，洪水幅度为增加趋势。与AMPD洪水系列相似，1956—1990年为保持平稳期，有小幅波动，除1981年为正距平外，其余大部分为负距平；1991—2021年为波动增加趋势。M-K检验中POT3M洪水系列的幅度变化通过了显著性水平0.01的检验，为显著性增加趋势。

3.2.2 POT3M洪水系列频次变化

POT3M洪水系列频次变化趋势如图4所示。从线性变化趋势和5 a平滑曲线来看，洪水频次为增加趋势。1956—1985年有小幅波动，大体为平稳期；1986—2021年为波动性增加趋势。与POT3M洪水系列的幅度变化不同，M-K检验中频次变化通过了0.05的显著性检验，为显著性增加趋势。

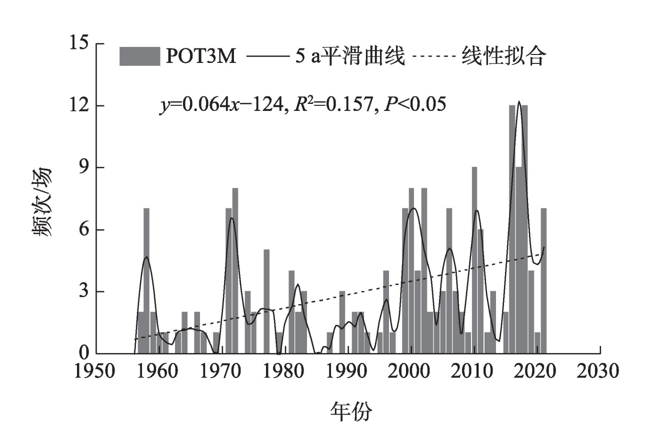


图4 1956—2021年疏勒河昌马堡水文站POT3M洪水系列频次变化趋势

Fig. 4 Trend in the frequency of POT3M flood series at Changmabao hydrological station in the Shule River from 1956 to 2021

3.3 基于GEV分布的洪水变化特征

3.3.1 不同级别洪水的重现期阈值计算 采用GEV分布拟合疏勒河昌马堡水文站AMPD洪水系列，拟合参数和拟合优度检验值见表3。从表3的结果分析可知，形状参数(ξ)大于0，服从Frechet分布。K-S检验值为0.109，小于显著性水平0.05的临界值0.196，拟合精度良好。PPCC检验值为0.95，表明

昌马堡水文站AMPD洪水系列服从GEV分布的Frechet分布，且高度相关。GEV分布对分析计算疏勒河昌马堡水文站的重现期阈值有很好的可靠性。同时采用MATLAB软件程序计算1956—2021年疏勒河昌马堡水文站的重现期阈值，结果如表4所示。

表3 1956—2021年疏勒河昌马堡水文站AMPD系列拟合参数与检验值

Tab. 3 Fitted parameters and test values of the AMPD series at Changmabao hydrological station in the Shule River from 1956 to 2021

水文站	形状参数(ξ)	尺度参数(σ)	位置参数(μ)	拟合分布	K-S检验	PPCC检验
昌马堡	0.018	107	258	Frechet分布	0.109	0.95

表4 1956—2021年疏勒河昌马堡水文站重现期阈值

Tab. 4 Threshold values of the return period at Changmabao hydrological station in the Shule River from 1956 to 2021

河流	水文站	重现期阈值/$m^3 \cdot s^{-1}$		
		1 a	5 a	20 a
疏勒河	昌马堡	98	420	585

3.3.2 **不同级别洪水频次变化** 采用GEV分布分别计算大洪水(重现期>20 a)、中洪水(5 a<重现期<20 a)和小洪水(重现期<5 a)的频次变化趋势(图5)。1956—2021年洪水发生的频次主要以小洪水为主，Sen's slope估计倾向率为0.085，且M-K检验中总洪水的频次通过了0.01的显著性检验，洪水频次变化为显著性增加趋势。

3.3.3 **不同年代际的洪水频次变化** 从图6可以看出，1956—2021年疏勒河昌马堡水文站不同年代际洪水频次总体为增加趋势。各年代相比较而言，1950s—1960s洪水发生频次较少，1970s开始增加，且1970s—2000s为保持平稳期，2010s达到洪水发生频次最大值。总体来看，疏勒河洪水发生频次演变趋势为由少向多转换。

3.4 降水和气温变化特征

由图7和图8可知，1956—2021年鱼儿红雨量站和托勒气象站的年降水量以及托勒气象站的气温总体呈现显著性增加的趋势。鱼儿红雨量站和托勒气象站的多年平均降水量分别为140.3 mm和302.4 mm，Sen's slope估计倾向率为6.9 mm·$(10a)^{-1}$和15.3 mm·$(10a)^{-1}$；托勒气象站的多年平均气温为−2.4 ℃，Sen's slope估计倾向率为0.35 ℃·$(10a)^{-1}$。

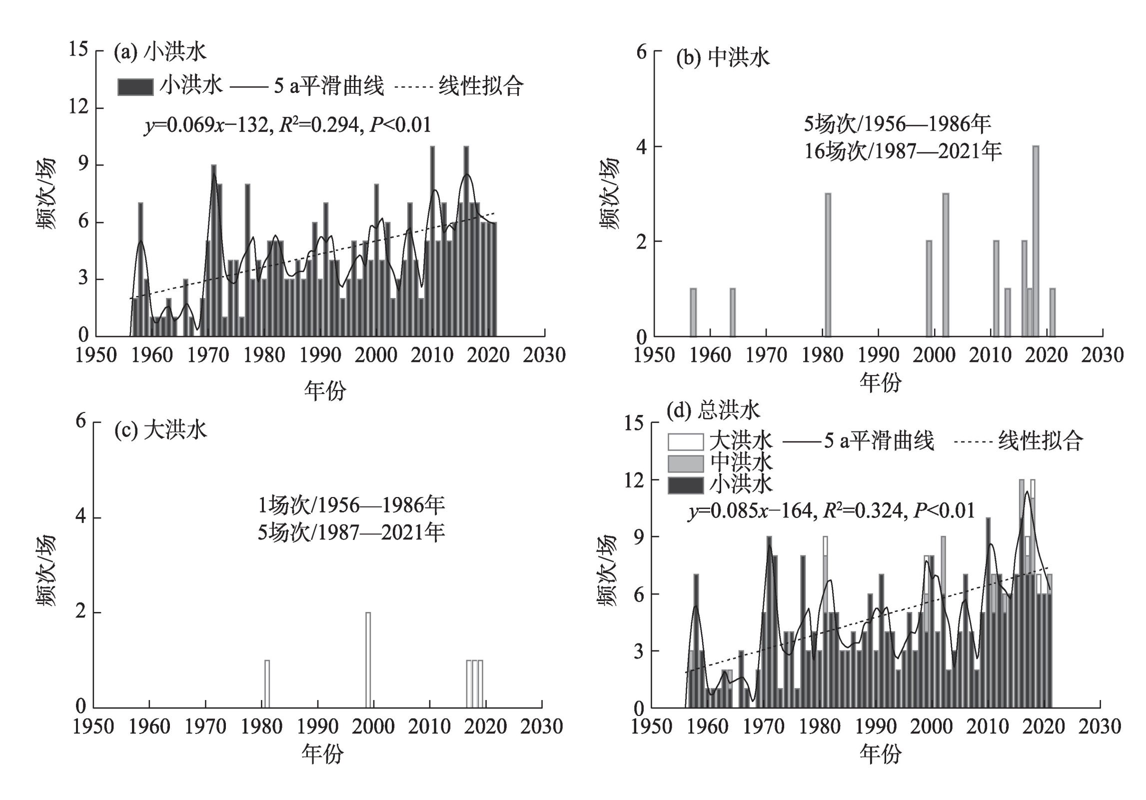


图5 1956—2021年疏勒河昌马堡水文站不同级别洪水频次变化趋势

Fig. 5 Trend in the frequency of different levels of floods at Changmabao hydrological station in the Shule River from 1956 to 2021

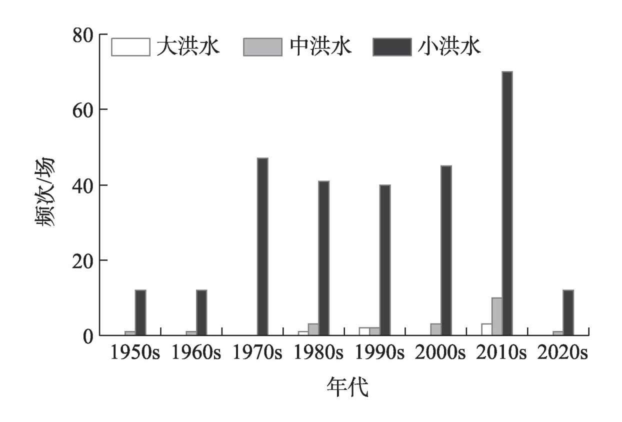


图6　1956—2021年疏勒河昌马堡水文站不同年代际洪水频次

Fig. 6　Frequency of interdecadal floods at Changmabao hydrological station in the Shule River from 1956 to 2021

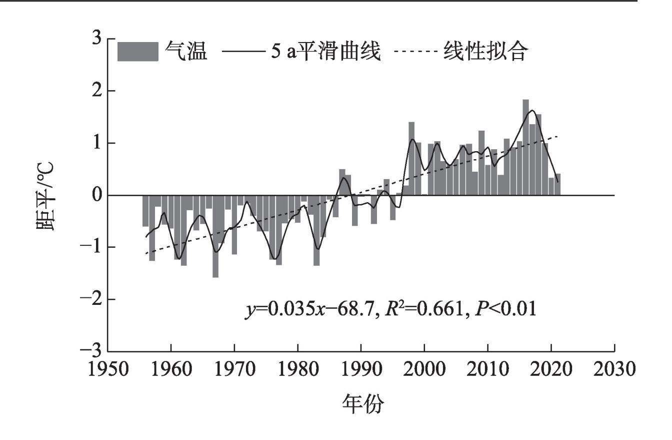
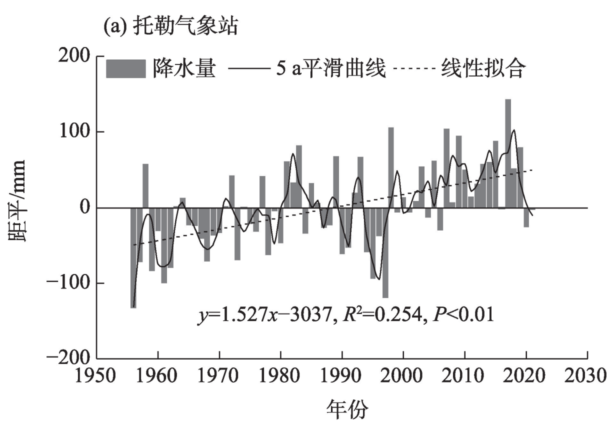


图8　1956—2021年托勒气象站气温变化趋势

Fig. 8　Trend of temperature change at Tuole meteorological station from 1956 to 2021



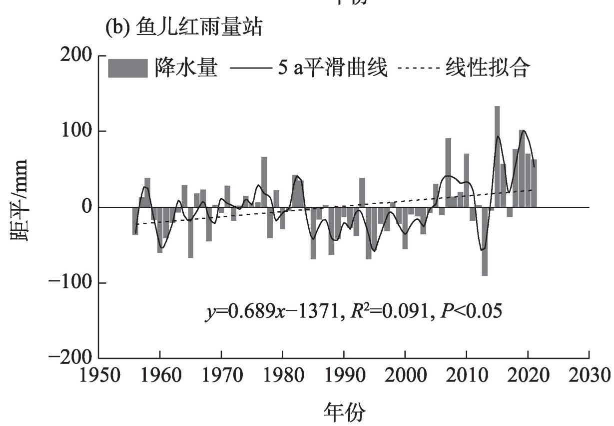
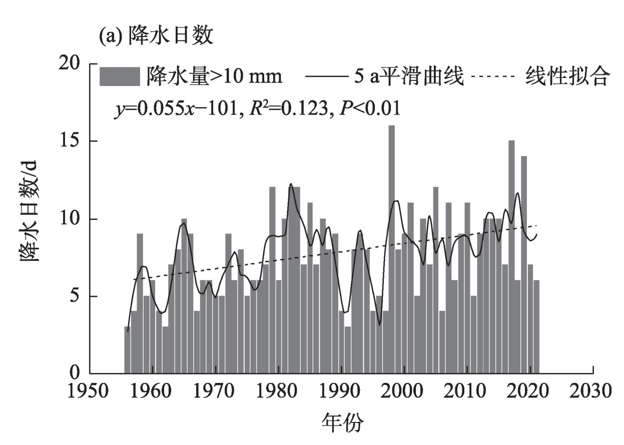


图7　1956—2021年托勒气象站和鱼儿红雨量站年降水量变化趋势

Fig. 7　Trends of annual precipitation at Tuole meteorological station and Yu'erhong rainfall station from 1956 to 2021



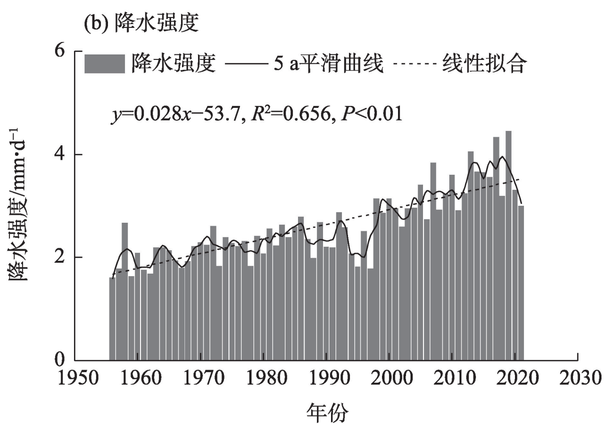


图9　1956—2021年托勒气象站降水要素变化趋势

Fig. 9　Trends in precipitation elements at Tuole meteorological station from 1956 to 2021

由图9可知，托勒气象站单场次降水量>10 mm的降水日数和年平均降水强度都为增加趋势。由图7~9分析可知，1987—2021年降水量和气温为正距平，且为持续增加态势。

4　讨　论

疏勒河上游区域大部分属于高海拔山区范围，从河源区至昌马堡水文站区间，海拔高差达2000多米，区间流域地形、坡度和下垫面等都有差异，上游

区域主要受高原季风和西风带大气环流系统的交汇影响，属于西风带气候区。通过分析流域内鱼儿红雨量站和周边托勒气象站的降水变化可知（图7、图9），过去几十年，疏勒河流域的降水量呈持续增加趋势，尤其是夏季降水量占总降水量比重越来越大[16-17]。已有研究成果也证实了降水量的变化趋势，如施雅风等[26]早在21世纪初期研究发现，从1987年开始整个西北地区的气候由暖干向暖湿转型，表现为温度上升、降水量增加、冰川消融量和径流量连续多年增加；蓝永超等[27]、徐浩劫等[28]研究发现，疏勒河上游降水量总体为增加趋势。从托勒气象站的气温变化趋势可知（图8），1987—2021年气温为显著性增加趋势。已有研究发现，1956—2010年疏勒河河源区的年平均气温以0.40 ℃·$(10a)^{-1}$的倾向率显著性升高[27]；中国西北干旱区气温的低温极值在1986年左右突变后呈现为显著性增加趋势[29-30]。在温升背景下，与冰川、积雪和冻土等冰冻圈要素相关的下垫面变化，对疏勒河等西部寒区流域产流机制已产生了显著的影响[31-32]。第一次冰川编目（1956—1983年）和第二次冰川编目（2005—2010年）数据的相关研究成果[33-34]显示，疏勒河冰川覆盖面积和冰储量为660条河509.87 km^2左右。随着温度逐渐升高，1960年以来疏勒河冰川融水呈现增加趋势[35]。Liu等[18]研究发现，在1960s—2010s期间气候持续变暖影响下，冰川融水对疏勒河的融水占比达到42.2%。对比分析鱼儿红雨量站和托勒气象站的降水和气温要素与昌马堡水文站洪水发生的幅度和频次，结果为正相关关系，变化趋势大体一致。

5 结 论

本文基于1956—2021年疏勒河上游昌马河出山口昌马堡水文站的实测洪水数据和相关气象数据，分析了AMPD洪水系列、POT3M洪水系列和基于GEV分布不同级别洪水系列的变化趋势及影响因素。主要结论如下：

（1）3种抽样洪水系列中AMPD系列和POT3M系列的幅度和频次为显著性增加趋势，基于GEV分布不同级别洪水系列以小洪水为主，且总洪水频次为显著性增加趋势。

（2）鱼儿红雨量站和托勒气象站的数据表明，1987以后气温和降水呈显著性波动增加趋势，强降雨和升温引起的冰川、高山积雪和冻土融水增加等原因是3种抽样洪水系列幅度和频次显著性增加主要驱动因素。

疏勒河上游山区的洪水变化特征受气候变化、冰冻圈要素变化和下垫面等原因的影响十分复杂，本文仅通过数理统计方法进行了简单的趋势分析，其洪水模拟和影响机制有待后期进一步深入研究。

参考文献（References）

[1] Desai B, Maskrey A, Peduzzi P, et al. Making development sustainable: The future of disaster risk management. Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction[R]. Genève, Suisse: United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNISDR), 2015.

[2] Alfieri L, Bisselink B, Dottori F, et al. Global projections of river flood risk in a warmer world[J]. Earths Future, 2017, 5(2): 171-182.

[3] Cornwall W. Europe's deadly floods leave scientists stunned[J]. Science, 2021, 373(6553): 372-373.

[4] Arnell Nigel W, Gosling Simon N. The impacts of climate change on river flood risk at the global scale[J]. Climate Change, 2014, 134: 387-401.

[5] Bloeschl G, Hall J, Viglione A, et al. Changing climate both increases and decreases European river floods[J]. Nature, 2019, 573: 108-111.

[6] Bloschl G, Hall J, Parajka J, et al. Changing climate shifts timing of European floods[J]. Science, 2017, 357(6351): 588-590.

[7] Kundzewicz Z W, Su B, Wang Y, et al. Flood risk in a range of spatial perspectives-from global to local scales[J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2019, 19(7): 1319-1328.

[8] Hodgkins G A, Whitfield P H, Burn D H, et al. Climate-driven variability in the occurrence of major floods across North America and Europe[J]. Journal of Hydrology, 2017, 552: 704-717.

[9] Mediero L, Santillan D, Garrote L, et al. Detection and attribution of trends in magnitude, frequency and timing of floods in Spain[J]. Journal of Hydrology, 2014, 517: 1072-1088.

[10] Zadeh S M, Burn D H, O'Brien N. Detection of trends in flood magnitude and frequency in Canada[J]. Journal of Hydrology-Regional Studies, 2020, 28: 13, doi: 10.1016/j.ejrh.2020.100673.

[11] Zhang Q, Gu X H, Singh V P, et al. Magnitude, frequency and timing of floods in the Tarim River Basin, China: Changes, causes and implications[J]. Global and Planetary Change, 2016, 139: 44-55.

[12] 蒋军新, 蔡明, 徐永军, 等. 新疆阿克苏河流域洪水演变趋势研究[J]. 冰川冻土, 2021, 43(4): 1200-1209. [Jiang Junxin, Cai Ming, Xu Yongjun, et al. Evolution trend of flood in the Aksu River Ba-

sin, Xinjiang[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2021, 43 (4): 1200-1209.]

[13] 毛炜峄, 樊静, 沈永平, 等. 近50 a来新疆区域与天山典型流域极端洪水变化特征及其对气候变化的响[J]. 冰川冻土, 2012, 34(5): 1037-1046. [Mao Weiyi, Fan Jing, Shen Yongping, et al. Variations of extreme flood of the rivers in Xinjiang region and some typical watersheds from Tianshan Mountains and their response to climate change in recent 50 years[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2012, 34(5): 1037-1046.]

[14] Wang X L, Chen R S, Li H Y, et al. Detection and attribution of trends in flood frequency under climate change in the Qilian Mountains, northwest China[J]. Journal of Hydrology-Regional Studies, 2022, 42: 101153, doi: 10.1016/j.ejrh.2022.101153.

[15] 王学良, 陈仁升, 刘俊峰, 等. 1956—2021年疏勒河流域主要河流出山径流变化及成因分析[J]. 干旱区研究, 2022, 39(6): 1782-1792. [Wang Xueliang, Chen Rensheng, Liu Junfeng, et al. Changes in runoff from major rivers and analysis of its causes in Shule River Basin from 1956—2021[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(6): 1782-1792.]

[16] Wang H J, Chen Y N, Li W H, et al. Runoff responses to climate change in arid region of northwestern China during 1960—2010 [J]. Chinese Geographical Science, 2013, 23(3): 286-300.

[17] Chen R S, Han C T, Liu J F, et al. Maximum precipitation altitude on the northern flank of the Qilian Mountains, northwest China[J]. Hydrology Research, 2018, 49(5): 1696-1710.

[18] Liu G H, Chen R S, Li K L. Glacial change and its hydrological response in three inland river basins in the Qilian Mountains, western China[J]. Water, 2021, 13(16): 2213, doi: 10.3390/w13162213.

[19] 盛煜, 李静, 吴吉春, 等. 基于GIS的疏勒河流域上游多年冻土分布特征[J]. 中国矿业大学学报, 2010, 39(1): 32-39. [Sheng Yu, Li Jing, Wu Jichun, et al. Distribution patterns of permafrost in the upper area of Shule River with the application of GIS technique[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2010, 39(1): 32-39.]

[20] Sen P K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's Tau[J]. Journal of the American Statistical Association, 1968, 63 (324): 1379-1389.

[21] Mann H B. Nonparametric test against trend[J]. Econometrica: Journal of the Econometric Society, 1945, 13(3): 245-259.

[22] Kendall M G. Rank correlation methods[J]. British Journal of Psychology, 1975, 25(1): 86-91.

[23] 郭生练, 刘章君, 熊立华. 设计洪水计算方法研究进展与评价[J]. 水利学报, 2016, 47(3): 302-314. [Guo Shenglian, Liu Zhangjun, Xiong Lihua. Advances and assessment on design flood estimation methods[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 47(3): 302-314.]

[24] Lang M, Ouarda T, Bobee B. Towards operational guidelines for over-threshold modeling[J]. Journal of Hydrology, 1999, 225(3-4): 103-117.

[25] 陈庭兴, 吕海深, 朱永华. 基于GEV分布的西营河流域洪水特性分析[J]. 干旱区研究, 2021, 38(6): 1563-1569. [Chen Tingxing, Lü Haishen, Zhu Yonghua. Analysis of flood characteristics in Xiying River Basin based on GEV distribution[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(6): 1563-1569.]

[26] 施雅风, 沈永平, 李栋梁, 等. 中国西北气候由暖干向暖湿转型的特征和趋势探讨[J]. 第四纪研究, 2003, 23(2): 152-164. [Shi Yafeng, Shen Yongping, Li Dongliang, et al. Discussion on the present climate change from warm-dry to warm-wet in northwest China[J]. Quaternary Sciences, 2003, 23(2): 152-164.]

[27] 蓝永超, 胡兴林, 丁宏伟, 等. 气候变暖背景下祁连山西部山区水循环要素的变化——以疏勒河干流上游山区为例[J]. 山地学报, 2012, 30(6): 675-680. [Lan Yongchao, Hu Xinglin, Ding Hongwei, et al. Variation of water cycle factors in the western Qilian Mountain area under climate warming: Taking the mountain watershed of the main stream of Shule River Basin for example[J]. Journal of Mountain Science, 2012, 30(6): 675-680.]

[28] 徐浩杰, 杨太保, 张晓晓. 近50年来疏勒河上游气候变化及其对地表径流的影响[J]. 西安理工大学学报, 2014, 34(4): 40-45, 52. [Xu Haojie, Yang Taibao, Zhang Xiaoxiao. Climate change in upstream area of Shule River and its effects on runoff-yield in last 50 years[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2014, 34(4): 40-45, 52.]

[29] Chen Y N, Li Z, Fan Y T, et al. Progress and prospects of climate change impacts on hydrology in the arid region of northwest China [J]. Environmental Research, 2015, 139: 11-19.

[30] 陈亚宁, 王怀军, 王志成, 等. 西北干旱区极端气候水文事件特征分析[J]. 干旱区地理, 2017, 40(1): 1-9. [Chen Yaning, Wang Huaijun, Wang Zhicheng, et al. Characteristics of extreme climatic/hydrological events in the arid region of northwestern China[J]. Arid Land Geography, 2017, 40(1): 1-9.]

[31] 陈仁升, 张世强, 阳勇, 等. 冰冻圈变化对中国西部寒区径流的影响[M]. 北京: 科学出版社, 2019: 45-73. [Chen Rensheng, Zhang Shiqiang, Yang Yong, et al. The impacts of cryospheric changes on cold region runoff in western China[M]. Beijing: Science Press, 2019: 45-73.]

[32] 晋子振, 秦翔, 赵求东, 等. 祁连山西段老虎沟流域消融季径流变化特征研究[J]. 干旱区地理, 2023, 46(2): 178-190. [Jin Zizhen, Qin Xiang, Zhao Qiudong, et al. Characteristics of runoff variation during ablation season in Laohugou watershed of western Qilian Mountains[J]. Arid Land Geography, 2023, 46(2): 178-190.]

[33] 孙美平, 刘时银, 姚晓军, 等. 近50年来祁连山冰川变化——基于中国第一、二次冰川编目数据[J]. 地理学报, 2015, 70(9): 1402-1414. [Sun Meiping, Liu Shiyin, Yao Xiaojun, et al. Glacier changes in the Qilian Mountains in the past half century: Based on the revised First and Second Chinese Glacier Inventory[J]. Acta Geographica Sinica, 2015, 70(9): 1402-1414.]

[34] 刘时银, 姚晓军, 郭万钦, 等. 基于第二次冰川编目的中国冰川现状[J]. 地理学报, 2015, 70(1): 3-16. [Liu Shiyin, Yao Xiaojun,

Guo Wanqin, et al. The contemporary glaciers in China based on the Second Chinese Glacier Inventory[J]. Acta Geographica Sinica, 2015, 70(1): 3-16.]

[35] 丁永建, 张世强, 吴锦奎, 等. 中国冰冻圈水文过程变化研究新进展[J]. 水科学进展, 2020, 31(5): 690-702. [Ding Yongjian, Zhang Shiqiang, Wu Jinkui, et al. Recent progress on studies on cryospheric hydrological processes changes in China[J]. Advances in Water Science, 2020, 31(5): 690-702.]

Characteristics of flood changes in mountainous areas of upper Shule River from 1956 to 2021

WANG Xueliang[1,2,3], CHEN Rensheng[1], LIU Junfeng[1], CAO Shanshan[4]

(1. Qilian Alpine Ecology and Hydrology Research Station, Northwest Institute of Eco-environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, Gansu, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Pingliang Hydrological Station of Gansu Province, Pingliang 744000, Gansu, China; 4. Hydrological Station of Gansu Province, Lanzhou 730000, Gansu, China)

Abstract: Based on measured flood data for 1956—2021 from the Changmabao hydrological station at the outlet of the Changma River in the upper reaches of the Shule River, northwest China, and on temperature and precipitation data from Yu'erhong rainfall station and Tuole meteorological station in the vicinity of the basin, the variation characteristics of annual maximum peak discharge (AMPD), peaks over threshold (POT3M), and floods based on the generalized extreme value (GEV) distribution at different levels were sampled and analyzed using Sen's slope estimator and the Mann-Kendall test. The results showed the following: (1) Both the magnitude and frequency of floods at the Changmabao hydrological station during the studied period significantly increased, with AMPD and POT3M magnitudes showing highly significant increases ($P<0.01$) and POT3M frequency showing significant increases ($P<0.05$). Based on the GEV distribution, floods were mainly small floods and the frequency of total floods was highly significant ($P<0.01$). (2) Temperature and precipitation showed a fluctuating increasing trend after 1987, and heavy precipitation and increased meltwater from glaciers, alpine snow, and permafrost due to warming were the main causes of the observed significant increases in flood magnitude and frequency in the three sampled series.

Key words: Shule River; Changmabao hydrological station; flood; variation characteristics